Argumente zum Umweltschutz in der Luftfahrt



Bild: kendallpools, Pixabay

Die Passagierkilometer im Luftverkehr sind über Jahrzehnte um durchschnittlich rund fünf Prozent jährlich gewachsen. Das entspricht einer Verdopplung alle 14 Jahre. Der Kraftstoffverbrauch pro Kopf und Kilometer konnte jedes Jahr aber um 1,5 Prozent gesenkt werden. Ein Prozent wurde durch flugbetriebliche Maßnahmen erreicht, 0,5 Prozent durch verbesserte Technik – insbesondere sparsamere Triebwerke. Es bleibt ein Wachstum des absoluten Kraftstoffverbrauchs der Luftfahrt von 3,5 Prozent pro Jahr, was einer Verdopplung alle 20 Jahre entspricht. Jedes Kilogramm verbrannter Kraftstoff produziert 3,15 Kilogramm Kohlendioxid (CO_2). Die CO_2-Emissionen der Luftfahrt steigen damit proportional zum absoluten Kraftstoffverbrauch an.

Aber wie ist das einzuordnen? Es heißt, dass die **CO_2-Emissionen** der **Luftfahrt** 2,4 Prozent aller menschengemachten CO_2-Emissionen ausmachen. Das klingt erst einmal nicht nach viel. Andererseits sind 80 Prozent der Menschen auf der Erde noch nie geflogen. Somit sind 20 Prozent der Weltbevölkerung für 100 Prozent der Emissionen verantwortlich. Ein Prozent der Weltbevölkerung – sogenannte Vielflieger – verursachen laut einer Studie der schwedischen Universität Lund 50 Prozent der CO_2-Emissionen der Zivilluftfahrt.

Aussagekräftiger ist die Betrachtung der **gesamten Emissionen** – nicht nur des CO_2. Der zivile Luftverkehr ist mit 3,5 Prozent an der menschengemachten Erderwärmung beteiligt, wenn man neben den CO_2-Effekten auch die Nicht-CO_2-Effekte einbezieht. Der Anteil der Zivilluftfahrt der EU ist für 13,9 Prozent der Emissionen des Verkehrssektors verantwortlich (**Bild 1**).

Wie das Ziel „Carbon-Neutral Growth“ verschwand

Die Luftverkehrswirtschaft verpflichtete sich 2009 auf ein **CO_2-neutrales Wachstum** (*Carbon-Neutral Growth*) ab dem Jahr 2020. Danach sollte die Luftfahrt weiter wachsen dürfen, die Netto-CO_2-Emissionen aber nicht mehr steigen. Ab dem Jahr **2020** sollte das Wachstum der CO_2-Emissionen kompensiert werden. Die Atmosphäre muss man sich wie ein Fass vorstellen, in das Wasser eingelassen wird. *Carbon-Neutral Growth* beschreibt die Idee, dass weiter Wasser fließt, der Wasserhahn aber nicht weiter aufgedreht wird. Das löst das Problem natürlich nicht, weil bei gleichem Zufluss das Fass irgendwann überlaufen wird.

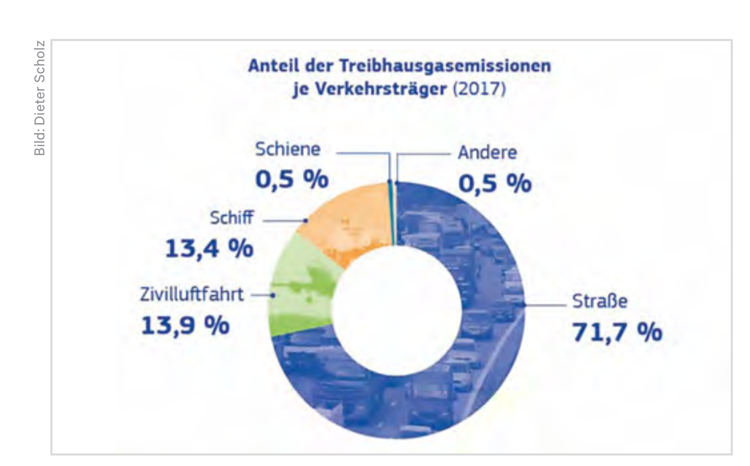


Bild: Dieter Scholz

Bild 1: Der Anteil der Zivilluftfahrt an den Emissionen des Verkehrssektors beträgt in der EU 13,9 Prozent

Das Jahr 2020 kam, aber Carbon-Neutral Growth und die erforderlichen **Kompensationen** fanden **nicht statt** und wurden auch nicht angesprochen. Januar und Februar verstrichen. Dokumente zum Carbon-Neutral Growth fand man auf dem Server der *International Air Transport Association (IATA)* nicht mehr. Dann kam die Coronapandemie und mit dem „Lockdown“ blieb ein Großteil der Flugzeuge am Boden. Im internationalen *Carbon Offsetting and Reduction Scheme for International Aviation (CORSIA)* der *Internationalen Zivilluftfahrtorganisation (ICAO)* lebt die Idee vom Carbon-Neutral Growth jedoch weiter. Die Anwendung des Programms ist aber in der Coronapandemie neu definiert worden. Daher kommt es zu keiner Kompensation.

„Zero Emission“

Carbon-Neutral Growth wurde von der Luftverkehrswirtschaft unterdessen durch das physikalisch **unmögliche** Ziel „Zero Emission“ ersetzt – und das ohne konkrete Kompensationsverpflichtung. Laut einer Studie des Think Tanks *InfluenceMap* aus dem Jahr 2021 stecke hinter „Zero Emission“ eine Doppelstrategie, um Regulierungen von klimaschädlichen Emissionen zu vermeiden. Die Branche habe auf europäischer Ebene die volle Unterstützung für das Ziel „Net-Zero-Carbon Emissions“ des EU-Luftverkehrs bis 2050 kommuniziert, sich aber gleichzeitig im direkten Engagement mit politischen Entscheidungsträgern gegen spezifische nationale und EU-weite Regulierungen zur Erreichung dieses Ziels ausgesprochen, heißt es hier und in weiteren Quellen. Die britische Umweltorganisation *Possible* konstatiert in einer aktuellen Studie, dass 50 Klimaziele der Luftfahrtindustrie entweder verfehlt, aufgegeben oder vergessen wurden.

Erderwärmung durch die Luftfahrt

CO_2 verteilt sich wegen seiner langen atmosphärischen Verweildauer (mehr als hundert Jahre) gleichmäßig in der Atmosphäre. Die **Nicht-CO_2-Effekte** sind alle **kurzlebig** (Stunden bis Dekaden), daher sind sie nicht gleichmäßig verteilt, sondern wirken sich in Abhängigkeit von der Flughöhe, dem geographischen Ort der Emissionen, von der Zeit und der Wetterlage aus. Die wichtigsten Nicht-CO_2-Effekte sind die Kondensstreifen und die sich daraus entwickelnden Kondensstreifen-Zirren (im Mittel erwärmend), die Folgen der NO_x-(Stickstoffoxide)-Emissionen auf die Ozon- und Methankonzentration sowie auf den stratosphärischen Wasserdampf (im Mittel erwärmend) und die indirekten Wolkeneffekte aufgrund Luftfahrt-induzierter Aerosole (im Mittel vermutlich kühlend).

Der gesamte **Strahlungsantrieb** (*Effective Radiative Forcing, ERF*) der Luftfahrt ist dreimal so groß wie der des CO_2 allein. Die Nicht-CO_2-Effekte machen also zwei Drittel des gesamten Strahlungsantriebs aus. Die NO_x-Emissionen haben daran einen Anteil von einem Viertel.

Betrachten wir mittlere Breiten, so ist die Wirkung der **Kondensstreifen** und **Kondensstreifen-Zirren** in Reiseflughöhe (circa zehn Kilometer) besonders hoch. Durch eine angepasste Wahl der Flugtrajektorien wird die Bildung persistenter Kondensstreifen vermieden. Das wäre nur für wenige Flüge erforderlich und kann geschehen, indem kritische Regionen in gleicher Flughöhe

umflogen werden (der Flugweg wird länger) oder in geringerer Flughöhe geflogen wird (für Triebwerke und Aerodynamik etwas weniger optimal). Der Kraftstoffverbrauch und damit die CO_2-Emissionen würden leicht ansteigen. Insgesamt könnte die **Umweltwirkung** des Luftverkehrs auf diese Weise erheblich **vermindert** werden. Nennenswerte Argumente stehen dem Vorgehen nicht im Weg, aber mehr Kraftstoff kostet mehr. Die Kosten würden im Mittel aber nur um wenige Zehntel Prozent steigen. Schließlich müsste nur die Flugtrajektorie weniger Flüge verändert werden. Es gibt noch keine Lösung, wie man die erforderlichen Trajektorien rechtlich belastbar einfordern könnte. Deswegen wird diese wirksame Möglichkeit bis auf erste Testflüge noch nicht genutzt.

Ziele der EU

Nach dem **Green Deal** der EU von 2019 sollen „im Jahr 2050 keine Netto-Treibhausgasemissionen mehr freigesetzt werden [...]. Um Klimaneutralität zu erreichen, müssen die verkehrsbedingten Emissionen bis 2050 um 90 Prozent gesenkt werden." Das bedeutet, dass die restlichen zehn Prozent der Emissionen kompensiert werden dürfen. Als Zwischenziel zum Green Deal sollen die Treibhausgasemissionen bis 2030 im Vergleich zu 1990 um 55 Prozent reduziert werden. Unter dem Motto **„Fit for 55"** hat die EU-Kommission auch verschiedene konkrete Vorschläge für die Luftfahrt unterbreitet.

Die Luftfahrt steht also vor einem **Problem**. Die Emissionen sind seit 1990 durch die Zunahme des Luftverkehrs stetig gewachsen. Die Reduktion um 55 Prozent im Vergleich zu 1990 bedeutet für die Luftfahrt daher eine Reduktion um mehr als 80 Prozent bis 2030, also um etwa zehn Prozent pro Jahr. Der Kraftstoffverbrauch pro Personenkilometer konnte bisher jährlich durch operative Maßnahmen und Technologien um 1,5 Prozent gesenkt werden. Der Luftverkehr müsste bei gleichbleibenden Maßnahmen und konstantem Technologiefortschritt daher noch um **8,5 Prozent pro Jahr** dauerhaft **schrumpfen**. Das ist in der Praxis weder zu schaffen noch gewollt. Die Luftfahrt würde die EU-Ziele so verfehlen (**Bild 2**).

Vom Kerosin zu den neuen Energieträgern der Luftfahrt

Fossile Energie (Erdöl) ist so praktisch, weil es der Erde entnommen wird und nach einer vergleichsweise leichten Bearbeitung als **Kerosin** im Passagierflugzeug genutzt werden kann. Kerosin hat pro Kilogramm sehr viel Energie gespeichert (43 Megajoule) und benötigt wegen einer hohen Dichte (800 Kilogramm pro Kubikmeter) wenig Volumen.

Sollen Flugzeuge ohne fossile Energien auskommen, dann muss Energie auf andere Weise bereitgestellt und in passender Form an Bord gebracht werden. In Deutschland besteht weitgehend Konsens, dass als **Energielieferanten** für die **Luftfahrt** nur regenerative Energien infrage kommen. Es geht also um Strom aus **Wind**, **Biomasse**, **Sonne** und **Wasserkraft**. In Deutschland ist die Atomenergie als Energielieferant für die Luftfahrt nicht mehrheitsfähig. Batterien können den Ökostrom direkt aufnehmen, sind aber zu schwer. Wasserstoff oder synthetisches Kerosin müssten mithilfe von Ökostrom erst erzeugt werden.

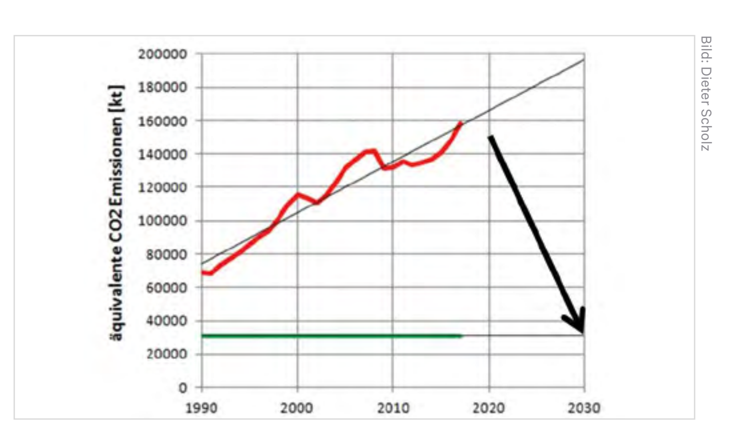


Bild 2: Die äquivalenten CO_2-Emissionen (in 1.000 Tonnen oder kt) der internationalen Luftfahrt in der EU steigen kontinuierlich (rote Linie), dabei sollen die Emissionen eigentlich nach dem „Green Deal" der EU gesenkt werden (bis 2030) auf 45 Prozent des Wertes von 1990 (grüne Linie).

Mit Wasserstoff CO_2-frei fliegen

Zur Herstellung von „grünem" Wasserstoff wird Wasser mittels Ökostrom und Elektrolyse in **Wasserstoff** und Sauerstoff zerlegt. Der Wasserstoff kann bei rund minus 250 Grad Celsius flüssig als *Liquid Hydrogen (LH_2)* in speziellen Tanks im Flugzeug transportiert werden. LH_2 kann in leicht modifizierten Strahltriebwerken genutzt oder mithilfe von Brennstoffzellen in Strom für elektrische Triebwerke umgewandelt werden. Da Wasserstoff aber eine deutlich geringere Energiedichte hat und die Lagerung spezielle Voraussetzungen erfordert, müssten erst **neue Flugzeuge** gebaut und die nötige Infrastruktur an den Flughäfen geschaffen werden.

Ursprünglich hatte *Airbus* geplant, bis 2035 ein mit Wasserstoff betriebenes Flugzeug anzubieten. Der Hersteller erklärte jedoch vertraulich gegenüber der EU, dass ein LH_2-Mittelstreckenflugzeug (100 bis 250 Sitze) **nicht** vor **2050** zum Einsatz kommen wird. Auch dann werden nicht alle Flugzeuge mit Wasserstoff fliegen. Es wird weiterhin Flugzeuge mit Kerosin geben. Flugzeuge sind gewöhnlich 30 Jahre im Einsatz. Entsprechend lange wird es dauern, bis ein Austausch stattgefunden hat. Wasserstoffflugzeuge werden für die Ziele der EU also zu spät kommen.

Durch **Umwandlungsverluste** ist die benötigte Ökostrommenge 1,7-mal so hoch wie die Energie im erzeugten flüssigen Wasserstoff. Weiterhin benötigen voluminöse Wasserstoffflugzeuge durch die großen und schweren Tanks etwa 1,3-mal mehr Energie.

Bei der Wasserstoffverbrennung entsteht kein CO_2, aber Nicht-CO_2-Effekte sind zum Teil weiterhin vorhanden. Flugzeuge, die Wasserstoff in Strahltriebwerken verbrennen, führen somit nicht zu „Zero Emission".

Synthetische Kraftstoffe sind problematisch

Um eine Lösung für existierende Flugzeuge anzubieten, soll **synthetisches Kerosin** (E-Fuel) aus **Strom**, **Wasser** und **CO_2** hergestellt werden. E-Fuels sind neben den Biokraftstoffen eine Variante der *Sustainable Aviation Fuels (SAF)*. Mit Elektrolyse wird aus Wasser zunächst Wasserstoff gewonnen. CO_2 muss mittels *Direct Air Capture (DAC)* aus der Luft entnommen werden (Kohlenstoffkreislauf). Mit dem *Fischer-Tropsch-Verfahren* werden die Komponenten zum Kraftstoff verbunden (**Bild 3**).

Bild: Dieter Scholz

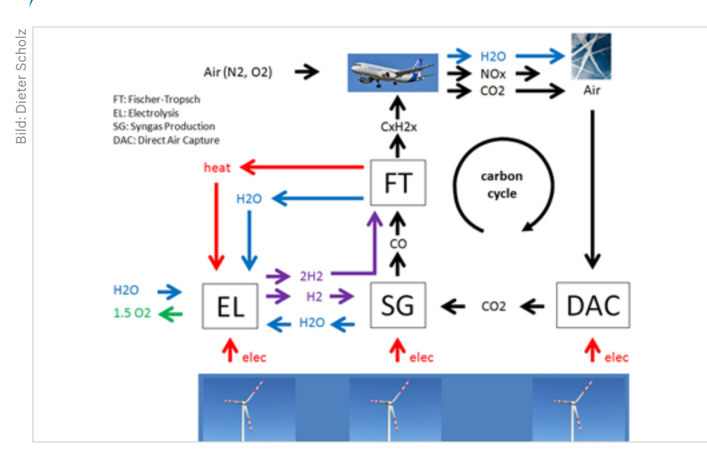


Bild 3: Herstellung von synthetischem Kerosin (E-Fuel) mit Power-to-Liquid (PtL). Durch die Entnahme von CO_2 aus der Luft (Direct Air Capture, DAC) wird ein Kohlenstoffkreislauf (Carbon Cycle) ermöglicht.

Über die Umwandlungsverluste bei der Herstellung der E-Fuels gibt es stark abweichende Angaben. Die benötigte Ökostrommenge ist 2,2- bis 4,5-mal so hoch wie die Energie im erzeugten synthetischen Kerosin. Es wären **50** der größten **Windräder** erforderlich, um ein Langstreckenpassagierflugzeug einmal am Tag mit E-Fuel zu betanken. Wird ein Strommix zugrunde gelegt und nicht reiner Ökostrom, dann ergibt sich mit SAF kein CO_2-Vorteil – gleiches gilt übrigens auch beim Wasserstoff.

Zu beachten ist weiterhin:

- E-Fuels erzeugen aufgrund der Nicht-CO_2-Effekte noch immer fast zwei Drittel der Klimawirkung, weil das synthetische Kerosin dem herkömmlichen weitgehend entspricht.
- Durch angepasste Flugtrajektorien können Nicht-CO_2-Effekte bei SAF, LH_2 und Kerosin reduziert werden.
- *Direct Air Capture (DAC)* ist wenig ausgereift, energieintensiv und erfordert große Anlagen.
- Wenn CO_2 einer Punktquelle (zum Beispiel einem Kohlekraftwerk) entnommen wird, trägt diese nur über das Flugzeug und nicht mehr selbst zur CO_2-Produktion bei. So kann die CO_2-Reduktion der Luftfahrt nur zur Hälfte angerechnet werden.
- Bei E-Fuels treten trotzdem die Nicht-CO_2-Effekte auf. Sie sind also nur dann klimaneutral, wenn neben dem CO_2 für den Kohlenstoffkreislauf noch zusätzlich die doppelte Menge mit CO_2-Abscheidung und Speicherung *(Carbon Dioxide Capture and Storage, CCS)* kompensiert wird.

Die Reduktion des Luftverkehrs ist unumgänglich

Kein anderes Verkehrsmittel erzeugt pro Person und Zeit eine so hohe Klimawirkung wie ein Passagierflugzeug. Alle diskutierten Lösungen haben ihre Probleme. Eine wirkungsvolle Senkung der Emissionen der Luftfahrt kann nur durch eine **Reduktion** des **Luftverkehrs** erfolgen. Wenn keine Verbote ausgesprochen werden sollen und können, sollte zumindest das Vielfliegen nicht weiter gefördert werden. Vielfliegerprogramme mögen für die Fluggesellschaften Kundenbindung bringen, sind aber in Zeiten des Klimawandels nicht mehr zeitgemäß und gehören auf den Prüfstand. Im Extremfall führen sie zu suchtartigem Verhalten, wenn „Mile Runners" sich mit ihrem Vielfliegerstatus aufwerten wollen. Dieses Verhalten hat schon 2009 der Kinofilm „Up in the Air" thematisiert. ●

DEFINITIONEN VON ZIELEN FÜR DIE LUFTFAHRT

Hier Definitionen von Zielen der Luftfahrt in Anlehnung an den Sprachgebrauch des *Deutschen Zentrums für Luft- und Raumfahrt (DLR):*

Emissionen sind der Ausstoß von bestimmten, üblicherweise schädlichen Stoffen sowie einige immaterielle Störfaktoren wie Lärm. Die Vision **Null-Emissionen** (Zero Emission) stellt ein ideales Ziel dar, das physikalisch nicht erreicht werden kann.

Eine **umweltverträgliche Luftfahrt** (Green Aviation) berücksichtigt ebenfalls alle Emissionen, legt sich aber nicht auf einen absoluten Nullwert der angestrebten Emissionen fest.

Eine **nachhaltige Luftfahrt** (Sustainable Aviation) betrachtet zusätzlich zur umweltverträglichen Luftfahrt auch soziale Aspekte.

Eine **klimaneutrale Luftfahrt** (Climate-Neutral Aviation) wird durch eine ausgeglichene Klimawirkung aller CO_2-, aber auch Nicht-CO_2-Effekte charakterisiert, sodass die Luftfahrt keinen Nettobeitrag zur Erderwärmung liefert. Insbesondere der Lärm wird hier nicht betrachtet. Emissionen können durch unterschiedliche technische und marktbasierte Mechanismen kompensiert werden.

Eine **CO_2-neutrale Luftfahrt** oder Netto-Null CO_2 (Net-Zero CO_2) berücksichtigt nur die CO_2-Emissionen als einfache und etablierte Messgröße. CO_2-Emissionen können hier durch unterschiedliche technische und marktbasierte Mechanismen kompensiert werden.

Eine **CO_2-freie Luftfahrt** oder Null CO_2 (Zero CO_2) berücksichtigt ebenfalls nur die CO_2-Emissionen als einfache und etablierte Messgröße. Innerhalb einer definierten Systemgrenze dürfen keine CO_2-Emissionen entstehen. Das geschieht entweder durch die globale Betrachtung des gesamten Flugzeuglebenszyklus (well-to-wake) oder mit dem Flugzeug als Systemgrenze (tank-to-wake).

DER AUTOR

Prof. Dr. Dieter Scholz ist Leiter der *DGLR-Bezirksgruppe Hamburg*. An der *HAW Hamburg* vertritt er die Fächer Flugzeugentwurf, Flugmechanik und Flugzeugsysteme in Forschung und Lehre. Er engagiert sich zum Thema Luftfahrt und Gesellschaft.

Dieser Artikel ist die Kurzfassung von:
SCHOLZ, Dieter, 2021. *Umweltschutz in der Luftfahrt – Hintergründe und Argumente zur aktuellen Diskussion. Bericht.* Hochschule für Angewandte Wissenschaften Hamburg, Aircraft Design and Systems Group (AERO). Verfügbar unter: https://doi.org/10.48441/4427.225
Quellen können dem Literaturverzeichnis des Berichts entnommen werden.